

## **General Disclaimer**

### **One or more of the Following Statements may affect this Document**

- This document has been reproduced from the best copy furnished by the organizational source. It is being released in the interest of making available as much information as possible.
- This document may contain data, which exceeds the sheet parameters. It was furnished in this condition by the organizational source and is the best copy available.
- This document may contain tone-on-tone or color graphs, charts and/or pictures, which have been reproduced in black and white.
- This document is paginated as submitted by the original source.
- Portions of this document are not fully legible due to the historical nature of some of the material. However, it is the best reproduction available from the original submission.

E83-10079

CR-145122



SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

SECRETARIADO DE RECURSOS SURVY  
fogrum information and without liability  
for any use made thereof."

RECEIVED BY  
NASA STI FACILITY  
DATE: 9/22/82  
DCAF NO. 092949  
PROCESSED BY  
 NASA STI FACILITY  
 ESA - SDS  AIAA

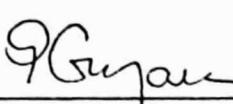
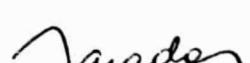
(E83-10079) COMPARISON OF DIVERSE METHODS  
FOR THE CORRECTION OF ATMOSPHERIC EFFECTS ON  
LANDSAT AND SKYLAB IMAGES (Instituto de  
Pesquisas Espaciais, São José) 27 F  
HC A03/MF A01

N83-14588

Unclassified  
CSCL 05B G3/43 00079



INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

1. Publicação nº INPE-2471-PRE/160	2. Versão	3. Data Julho, 1982	5. Distribuição <input type="checkbox"/> Interna <input checked="" type="checkbox"/> Externa <input type="checkbox"/> Restrita
4. Origem DSE/DIN	Programa IMAGE		
6. Palavras chaves - selecionadas pelo(s) autor(es) <i>IMAGENS DE SATELITE</i> <i>CORRECAO ATMOSFERICA</i> <i>METODO DE CORRECAO</i>			
7. C.D.U.: 621.376.5			
8. Título	INPE-2471-PRE/160 <i>COMPARAÇÃO DE DIVERSOS MÉTODOS PARA A CORREÇÃO DE EFEITO ATMOSFÉRICO EM IMAGENS LANDSAT E SKYLAB</i>		
9. Autoria	<i>Gilberto Câmara</i> <i>Luiz Alberto Vieira Dias</i> <i>Nelson Delfino d'Ávila Mascarenhas</i> <i>Ricardo Cartaxo Modesto de Souza</i> <i>Antônio Eduardo Costa Pereira</i>		
Assinatura responsável	 <i>G. Câmara</i>		
10. Páginas:	29		
11. Última página:	22		
12. Revisada por	 <i>UML</i> <i>Ubirajara M. B. Lima</i>		
13. Autorizada por	 <i>N. Parada</i> <i>Nelson de Jesus Parada</i> <i>Diretor</i>		
14. Resumo/Notas	<p>Recentemente com o advento do LANDSAT, SKYLAB e outros satélites e plataformas avançadas de monitoramento da Terra, cresceu em importância a necessidade de avaliar a extensão dos efeitos atmosféricos nos dados de sensoriamento remoto. A atmosfera terrestre diminui a habilidade dos recursos de discriminar corretamente o alvo. A correção radiométrica dos efeitos devidos à atmosfera pode melhorar o desempenho de um sistema interpretador automático de imagens, como o existente no Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). O presente trabalho apresenta uma comparação do desempenho dos diversos métodos, divulgados na literatura, com vistas ao desenvolvimento de um sistema de correção atmosférica próprio ao INPE.</p>		
<b>ORIGINAL PAGE IS OF POOR QUALITY</b>			
15. Observações	Este trabalho foi apresentado na 33ª Reunião Anual da SBPC, Salvador, BA, julho de 1981.		

**ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY**

**ABSTRACT**

Recently, with the advent of LANDSAT, SKYLIB, and other satellites, and platforms for Earth monitoring, the need for atmospheric correction was apparent on remote sensed data. Earth's atmosphere reduces the sensors ability in correctly discriminating targets. Using radiometric correction to reduce the atmospheric effects may improve considerably the performance of an automatic image interpreter. The Institute for Space Research, (Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE) has such an apparatus, and the present work presents a comparison of several methods, from the open literature, leading to the development of an atmospheric correction system for its needs.

## SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS .....	v
1. <u>INTRODUÇÃO</u> .....	1
2. <u>EFEITO DA ATMOSFERA EM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO</u> .....	1
3. <u>TEORIA DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA</u> .....	3
3.1 - Profundidade ótica .....	4
3.2 - Função fase de espalhamento .....	5
4. <u>O MÉTODO TURNER</u> .....	6
5. <u>MÉTODOS DE EXTENSÃO DE ASSINATURA</u> .....	10
6. <u>CORREÇÃO DE EFEITOS ATMOSFÉRICOS PARA IMAGENS NO MAR</u> .....	12
7. <u>CORREÇÃO DE EFEITO ATMOSFÉRICO NO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE KANAZAWA (JAPÃO)</u> .....	15
8. <u>COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES</u> .....	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	21

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 - Dependência angular de funções de fase de espalhamento num plano azimutal .....	7
2 - Dependência de profundidade ótica de Rayleigh com o comprimento de onda para a atmosfera padrão dos E.U.A. ....	9
3 - Profundidade ótica de aerossol ( $\tau_A$ ) em função do alcance visual, v. O parâmetro é o comprimento de onda, $\lambda$ .....	10
4 - Diagrama dos processos radiativos na atmosfera com refletor não-uniforme .....	16
5 - Diagrama de aproximações de reespalhamento simples .....	18

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

## 1. INTRODUÇÃO

A presença de atmosfera terrestre é causa de variados problemas na fotointerpretação, no reconhecimento e na classificação de alvos em sensoriamento remoto. A radiância aparente dos atributos terrestres medida por um satélite difere da radiância intrínseca da superfície, devido ao espalhamento e à absorção da radiação causados pelos gases e partículas presentes na atmosfera. O tom azulado presente em muitas imagens de plataformas orbitais como LANDSAT e SKYLAB torna claro ao observador humano tais efeitos. Uma das consequências comuns do efeito da atmosfera é a mistura, num mesmo elemento da imagem, de informações provenientes de pontos distintos da superfície. Torna-se evidente a importância de um procedimento de correção para tais efeitos, de modo a melhorar a eficiência da classificação de imagens LANDSAT e SKYLAB.

Neste trabalho faz-se uma comparação entre diversos métodos — divulgados na literatura — propostos para solucionar o problema. Inicialmente é apresentada a formulação teórica, fazendo-se posterior referência às várias aproximações utilizadas para tornar a solução computacionalmente viável. O conhecimento dos métodos expostos se mostrou fundamental ao desenvolvimento de um Sistema de Correção Atmosférica no INPE.

## 2. EFEITO DA ATMOSFERA EM DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

A atmosfera afeta a radiação recebida no sensor de quatro diferentes maneiras, a saber:

- 1) modificando a irradiância solar que chega ao topo da atmosfera para produzir a irradiância incidente sobre a superfície terrestre;
- 2) atenuando o sinal recebido do alvo terrestre;
- 3) espalhando radiação não-proveniente do alvo (radiância de trajetória) no campo de visada do sensor;

- 4) misturando assinaturas de alvos distintos num mesmo elemento da imagem resultante.

A equação que fornece a relação entre a radiância total  $L(h)$  medida pelo sensor a uma altitude  $h$  e a radiância intrínseca  $L_I$  do alvo é usualmente dada por

$$L(h) = L_I T(h) + L_p(h) \quad (1)$$

onde:

$L(h)$  ≡ radiância total do alvo medida pelo instrumento sensor;

$T(h)$  ≡ transmitância da atmosfera entre o alvo e o sensor;

$L_I$  ≡ radiância intrínseca do alvo;

$L_p(h)$  ≡ radiância de trajetória gerada pela presença de atmosfera entre o alvo e o sensor.

Supondo-se condições lambertianas (o que é o procedimento usual), a radiância intrínseca será obtida pela equação

$$L_I = \frac{\rho E_H}{\pi} \quad (2)$$

onde  $E_H$  ≡ irradiância incidente na superfície;

$\rho$  ≡ reflectância difusa efetiva do material.

Dentro dessa perspectiva, para levar em conta o efeito da atmosfera na medida do sensor, deve-se poder calcular a radiância de trajetória  $L_p$  (fonte de efeito aditivo); além disso, deve-se estimar o valor da transmitância atmosférica e a magnitude da irradiância incidente na superfície, para normalizar os valores da radiância total recebida pelo sensor. Com esse intuito, lança-se mão da teoria de transferência radiativa.

### 3. TEORIA DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

Descreve-se aqui, brevemente, as equações básicas e parâmetros da teoria de transferência radiativa. Para maiores detalhes, veja-se Chandrasekar (1950).

A equação de transferência radiativa pode ser escrita como

$$\mu \frac{d}{d\tau} L_D(\tau, \mu, \phi) = L_D(\tau, \mu, \phi) - J(\tau, \mu, \phi) \quad (3)$$

onde:

$\tau$  ≡ profundidade ótica da atmosfera;

$L_D$  ≡ radiância difusa;

$J$  ≡ função de fonte;

$\mu$  ≡  $\cos\theta$  (ângulo zenital da direção da radiação);

$\phi$  ≡ ângulo azimutal da direção da radiação.

A função de fonte  $J$  pode ser escrita mais explicitamente como

$$J(\tau, \mu, \phi) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 p(\mu, \phi, \mu', \phi') L_D(\tau, \mu', \phi') d\mu' d\phi' \\ - \frac{E_S(\tau)}{4\pi} p(\mu, \phi, -\mu_0, \phi_0 + \pi) \quad (4)$$

onde  $\mu', \phi'$  ≡ direção da radiação incidente;

$\mu, \phi$  ≡ direção de radiação espalhada;

$\mu_0, \phi_0$  ≡ parâmetros angulares que descrevem a posição do sol;

$E_S(\tau)$  ≡ irradiância solar direta numa área perpendicular ao fluxo solar na profundidade ótica  $\tau$ ;

$p(\dots)$  ≡ função fase de espalhamento.

A solução da Equação 3 para a radiância de trajetória ascendente (devido apenas ao espalhamento atmosférico), no topo da atmosfera, será

$$L_p(0, \mu, \phi) = \int_0^{\infty} J(\tau, \mu, \phi) e^{-\tau/\mu} \frac{d\tau}{\mu} \quad (5)$$

Subtraindo-se esse parâmetro da Equação 1, levando-se ainda em conta a transmitância da atmosfera e a irradiância descendente total na superfície, é possível corrigir o efeito da atmosfera na radiação medida pelos sensores dos satélites LANDSAT e SKYLAB. A seguir é feita uma discussão dos parâmetros mais relevantes para a resolução completa das Equações 3 e 5.

### 3.1 - PROFOUNDIDADE ÓTICA

E a quantidade que expressa o valor do espalhamento e absorção ocorridos. A profundidade ótica para uma altitude  $h$  acima do nível do mar é dada por

$$\tau = \int_h^{\infty} K(z) dz \quad (6)$$

onde  $K(z)$  é o coeficiente de extinção na altitude  $K$ . De uma maneira geral tem-se, considerando-se apenas o espalhamento,

$$K = K_{Rayleigh} + K_{Aerosol}$$

onde  $K_{Rayleigh}$  indica o coeficiente de extinção devido à presença de moléculas gasosas (espalhamento Rayleigh), e  $K_{Aerosol}$ , aquele resultante da presença de particulados (espalhamento MIE).

A profundidade ótica total (relativa ao nível do mar) é obtida a partir da equação

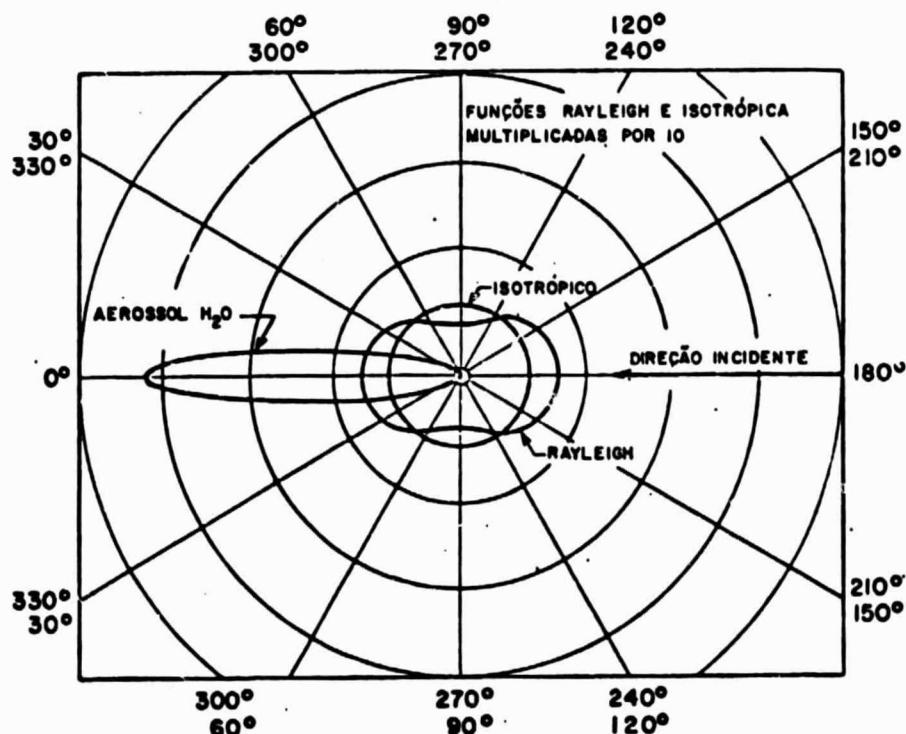
ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

$$\tau_0 = \int_0^{\infty} K(z) dz \quad \text{OF POOR QUALITY} \quad (7)$$

Usualmente separa-se a profundidade ótica em duas componentes: uma decorrente do espalhamento Rayleigh ( $\tau_R$ ), e a outra resultante do espalhamento Mie ( $\tau_A$ ).

### **3.2 - FUNÇÃO FASE DE ESPALHAMENTO**

A função fase de espalhamento simples – denotada por  $p(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi')$  – representa a fração da radiação espalhada da direção  $d\hat{\Omega}' = d(\mu') d\phi'$ , na direção  $d\hat{\Omega} = d(\mu) d\phi$ . No caso de espalhamento Rayleigh, a função de fase é uma distribuição de dipolo; porém, no caso de espalhamento por aerossóis, 95% da energia é usualmente espalhada para a frente. Isto é ilustrado na Figura 1.



**Fig. 1 - Dependência angular de funções de fase de espalhamento em plano azimutal.**

FONTE: Turner e Spencer, 1972.

Serão expostos a seguir diversos métodos propostos para compensar o efeito da atmosfera em imagens de satélite; diferenças essenciais – ressaltadas no curso do trabalho – são as maneiras de estimar as quantidades envolvidas.

#### 4. O MÉTODO DE TURNER

Desenvolvido na Universidade de Michigan, o método proposto por Turner e Spencer (1972) considera uma atmosfera homogênea, isotrópica, plano-paralela iluminada pela radiação solar direta fazendo um ângulo  $\theta_0$  com a normal. Entende-se como homogênea uma atmosfera cujas propriedades de espalhamento e absorção não dependam da profundidade ótica, isto é

$$p(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi') = p(\mu, \phi, \mu', \phi') \quad (8)$$

As suposições do modelo são as seguintes:

- 1) o albedo da superfície segue a lei de Lambert, isto é, é perfeitamente difuso;
- 2) não existe absorção na região onde ocorre espalhamento;
- 3) o alcance visual e a transmitância caracterizam o espalhamento por aerossóis ("haze");
- 4) não há nuvens;
- 5) a função de fase de espalhamento pode ser escrita como

$$p(\mu, \phi, \mu', \phi') = 4\pi n \delta(\mu - \mu') \delta(\phi - \phi') + 4\pi(1-n) \delta(\mu + \mu') \delta(\pi + \phi - \phi') \quad (9)$$

Como antes,  $\mu', \phi'$  refere-se à direção inicial e  $\mu, \phi$ , à direção final. O parâmetro  $n$  é a fração de energia que é espalhada para o hemisfério dianteiro e fornecido pela relação aproximada

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

$$n = \frac{0.5 \tau_R + 0.95 \tau_A}{\tau_R + \tau_A} \quad (10)$$

onde  $\tau_R$  é a profundidade ótica total de Rayleigh, e  $\tau_A$  é a profundidade ótica total de aerossol. A Equação 10 diz que no caso de uma atmosfera com muita concentração de aerossóis, então  $\tau_A \gg \tau_R$  e  $n \approx 0.95$ ; se existe pouco particulado presente, então  $\tau_A \ll \tau_R$  e  $n \approx 0.5$ .

Usando-se as aproximações acima, pode-se resolver a equação de transferência radiativa. Em termos de profundidade ótica, a radiação de trajetória no topo da atmosfera é dada por:

$$\begin{aligned} L_p(0, \mu_v, \phi) = & \frac{E_0}{4\pi [\mu_0 + (1-n)\tau_0]} \left\{ (1-n)\tau_0 [p(\mu_v, \phi_v, \mu_0, \pi+\phi_0) + \right. \\ & + p(\mu_v, \phi_v, -\mu_0, \phi_0)] + \mu_0 p(\mu_v, \phi_v, -\mu_0, \phi_0) + \\ & + \left. \frac{2\mu_0^2 \bar{\rho}}{1+2(1-\bar{\rho})(1-n)\tau_0} \right\} [1 - e^{-\tau_0/\mu_v}] + \\ & + \left\{ (1-n) [p(\mu_v, \phi_v, \mu_0, \pi+\phi_0) + p(\mu_v, \phi_v, -\mu_0, \phi_0)] - \right. \\ & - \left. \frac{8(1-n)\mu_0^2 \bar{\rho}}{1+2(1-\bar{\rho})(1-n)\tau_0} \right\} [(\tau_0 + \mu_v) e^{-\tau_0/\mu_v} - \mu_v] \end{aligned} \quad (11)$$

onde:

$E_0$  ≡ irradiância espectral solar extraterrestre (obtenível das tabelas de Thekaekara - cf. Turner e Spencer (1972));

$\bar{\rho}$  ≡ albedo médio do terreno,

e as funções de fase utilizadas são as fornecidas por Deirmendjian (1969) para uma distribuição continental de aerossóis "polidispersa" e para a função de fase de Rayleigh.

Os parâmetros necessários no modelo de Turner para o procedimento de correção são:

- 1) ângulo zenital solar ( $\theta_0$ ): ângulo entre o feixe solar direto e o nadir;
- 2) ângulo azimutal solar ( $\phi_0$ ): ângulo medido na direção dos ponteiros do relógio – a partir do norte verdadeiro até o plano solar, no plano tangente;
- 3) ângulo de visada do nadir ( $\theta_v$ ): ângulo entre a direção da linha-de-visada e o nadir;
- 4) ângulo de visada azimutal ( $\phi_v$ ): ângulo entre o norte verdadeiro e o plano de visada, medido na direção dos ponteiros do relógio;
- 5) albedo médio do terreno ( $\bar{\rho}$ ): normalmente obtido coletando-se informação para a região considerada e fazendo-se uma média ponderada das reflectâncias;
- 6) pressão da estação medida na superfície (P);
- 7) alcance visual horizontal.

Com o conhecimento das sete quantidades dadas acima, pode-se determinar a radiância de trajetória ( $L_p$ ) e a transmitância ( $T$ ); a partir disso, usando-se a Equação 1, calcula-se a radiância intrínseca do alvo ( $L_I$ ). Inicialmente acha-se a profundidade ótica padrão de Rayleigh  $\tau_{Ro}$  a partir da Figura 2. A profundidade ótica de Rayleigh  $\tau_R$  pode ser obtida por

$$\tau_R = \frac{P}{1013} \tau_{Ro} \quad (12)$$

onde  $P$  é pressão da estação em milibares.

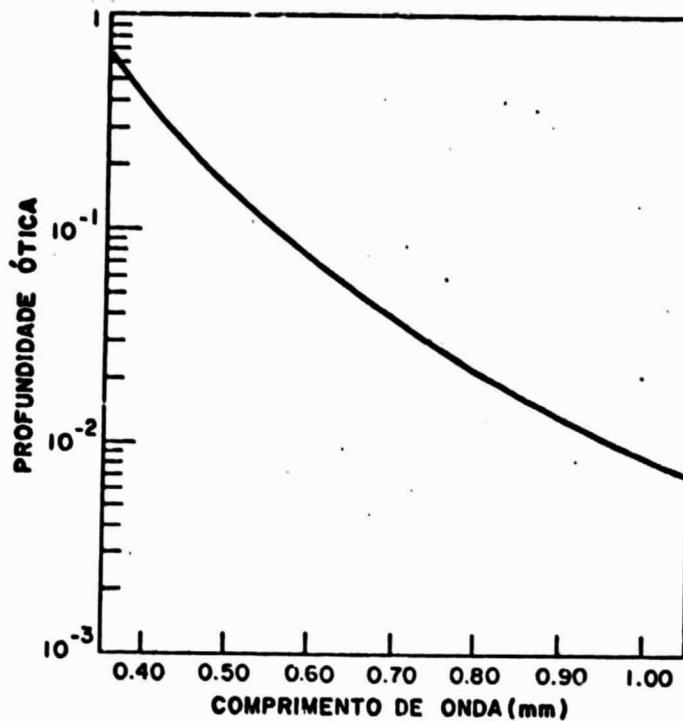


Fig. 2 - Dependência da profundidade ótica de Rayleigh com o comprimento de onda para a atmosfera padrão dos EUA.

FONTE: Op. cit.

A seguir, a profundidade ótica de aerossol  $\tau_A$  é obtida da Figura 3 para um dado alcance visual e um dado comprimento de onda. A soma de  $\tau_R$  e  $\tau_A$  dá a profundidade ótica total  $\tau_0$ , sendo a transmitância atmosférica  $T$  calculada como

$$T = e^{-\tau_0} \quad (13)$$

Calculando-se os valores de  $L_p$  a partir da Equação 11, completa-se o procedimento.

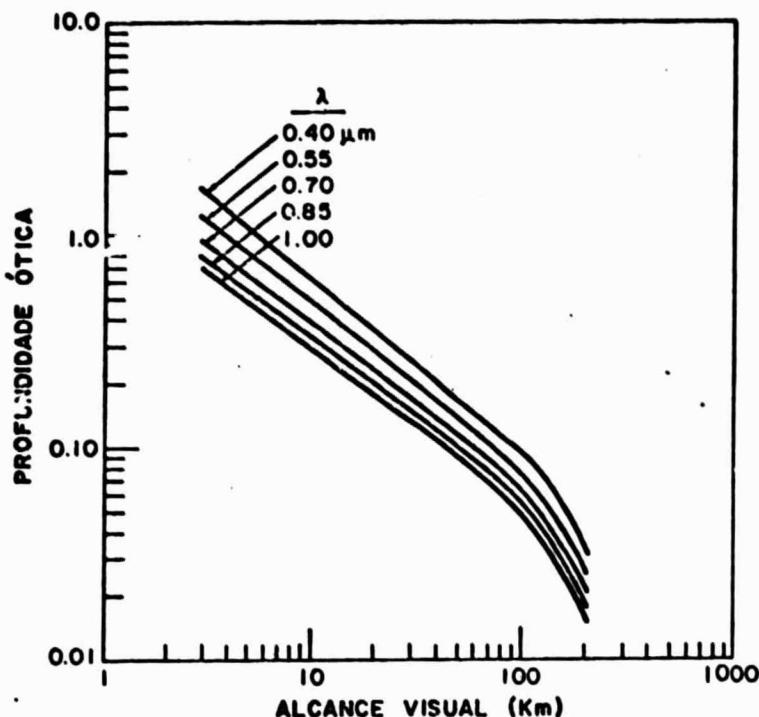


Fig. 3 - Profundidade ótica de aerossol ( $\tau_A$ ) em função do alcance visual, v. O parâmetro é o comprimento de onda,  $\lambda$ .

FONTE: Op. cit.

##### 5. MÉTODOS DE EXTENSÃO DE ASSINATURA

No levantamento de grandes áreas de terreno por meio de imagens de satélite, a etapa frequentemente mais custosa é a de fazer o treinamento dos algoritmos de classificação estatística. Seria jável, portanto, que se abreviasse essa tarefa efetuando-se o treinamento em uma área selecionada e que se utilizassem tais parâmetros estatísticos em outras áreas separadas geograficamente, ou na mesma área, separada temporalmente da área original.

Todavia, surgem problemas ao se tentar, pura e simplesmente, utilizar os parâmetros estatísticos da forma como foram inicialmente obtidos. Isto se deve às variações das condições de observação das imagens em épocas e/ou regiões diferentes. Tais mudanças podem ocorrer até mesmo dentro de uma mesma imagem de satélite. As fontes de variação

podem estar no próprio instrumento (instabilidades na eletrônica do ras  
treador ou do gravador, por exemplo), no meio ambiente (mudanças na ir  
radiância solar, posição do sol, transmitância atmosférica, ou radian  
cia de trajetória) ou na cena imageada (umidade do solo, estágio de ma  
turação das plantas).

Os métodos de correção radiométrica, para resolver tais problemas, dividem-se em duas categorias:

- 1) Métodos que visam corrigir explicitamente as distorções existentes, pela inversão do processo físico que causou tais distorções. Esse é o caso dos processos de correção atmosférica, que se baseiam em modelos físicos de transferência radiativa e que são abordados em outras seções deste trabalho.
- 2) Métodos que visam estabelecer uma correspondência entre duas imagens obtidas em condições diferentes, transformando os elementos de uma imagem ("pixels") de modo a "casar" seus parâmetros estatísticos com os de outra imagem.

A seguir, serão descritos os principais métodos incluídos no item 2 acima.

O processo mais simples consiste em ajustar o 1º momento (média) de uma das imagens, de modo a se igualar ao correspondente momento da 2ª imagem (Malila et alii, 1975).

O próximo grau de complexidade envolve a adição de uma constante e a multiplicação por um ganho (Henderson, 1976), escolhidos por um esquema de regressão linear aplicado às médias das agregações de dados obtidos das duas imagens (algoritmo MASC). Outros algoritmos que utilizam transformações sobre as médias das agregações são: OSCAR (Finley e Wehmanen, 1976), MODIFIED OSCAR (Wehmanen, 1976), ROOSTER (Finley, 1975), e MODIFIED ROOSTER (Wehmanen, 1976).

Dois métodos propostos (Thadani, 1977; Peters e Walter, 1975) desenvolvem o processo de estimativa da transformação linear para extensão de assinatura pelo critério de máxima verossimilhança.

A utilização do chamado processamento adaptativo – através de filtragem de Kalman (Crane, 1974) – tem sido objeto de investigação. Esse tipo de filtro permite pequenas variações dinâmicas no ajuste, em resposta a mudanças no sinal em cada tipo de cobertura do terreno, em oposição a um único ajuste global da média.

Alguns trabalhos que estabelecem comparações entre os desempenhos dos vários algoritmos propostos também foram desenvolvidos (Malila et alii, 1975; Abottern, 1977).

#### 6. CORREÇÃO DE EFEITOS ATMOSFÉRICOS PARA IMAGENS DO MAR

No caso de o alvo ser o oceano e/ou grandes corpos de água, o interesse é associar sua resposta espectral ao conteúdo de clorofila, para localizar áreas piscosas. Neste caso a abordagem é diferente da acima descrita. Para comprimento de onda acima de  $0,7 \mu\text{m}$ , o oceano comporta-se como um corpo negro; assim, toda radiação que chegar ao sensor no comprimento de onda  $\lambda > 0,7 \mu\text{m}$  é proveniente da atmosfera, e pode ser descontada dos canais de menor comprimento de onda após uma normalização adequada. O trabalho de Viollier et alii (1980) descreve em detalhe um modelo deste tipo. Neste modelo, três suposições são feitas:

- a) independência dos efeitos de espalhamento devido a moléculas (Rayleigh) e devido a aerossóis;
- b) dependência linear do efeito devido a aerossóis na profundidade ótica;
- c) superfície lambertiana.

A correção é feita em duas etapas, uma para o efeito Rayleigh e outra para os aerossóis. A correção é da forma

$$R = R_a + GT$$

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

(14)

onde  $R_a$  é a reflectância espalhada apenas pela atmosfera,  $R$  é a transmittância difusa da atmosfera, e  $G$  é a reflectância do alvo.

$R_a$  pode ser dividida em duas partes, uma devido à presença de moléculas na atmosfera  $R_a^M$ , e a outra devido a aerossóis  $R_a^A$

$$R_a = R_a^M + R_a^A \quad (15)$$

$R_a^M$  é proporcional a fatores geométricos e à profundidade ótica devido às moléculas atmosféricas

$$R_a^M = f(\text{geom}) \tau^M \quad (16)$$

Analogamente tem-se para  $R_a^A$

$$R_a^A = f'(\text{geom}) \tau^A$$

Para aerossóis, a transmitância difusa é diferente (em forma) da do caso Rayleigh. Portanto, para uma mistura aerossol e Rayleigh, considera-se (Viollier et alii, 1980):

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{4}(1+\exp(-\tau^M)/\mu_0)(1+\exp(-\tau^M)/\mu) - \\ &\quad - \left[ 1-\exp(-b\tau^A)\left(\frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0}\right) \right] \exp(-\tau^M) \left[ \frac{1}{\mu} + \frac{1}{\mu_0} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

onde  $\mu$  e  $\mu_0$  são, respectivamente, os cossenos dos ângulos de observação ( $\cos\theta$ ) e de incidência ( $\cos\theta_0$ ).

Comparando-se as reflectâncias em comprimentos de onda de 0,450  $\mu\text{m}$  e 0,650  $\mu\text{m}$ , para aerossóis, tem-se

$$R_{a_{450}}^A = \epsilon' R_{a_{650}}^A \quad (19)$$

onde

$$\epsilon' = 0,9 \tau \quad (20)$$

e

$$\epsilon = \frac{\tau_A(450)}{\tau_A(650)} ; \quad (21)$$

trata-se, portanto, de uma relação linear. Devem ser usados modelos de aerossóis como o de McClatchey et alii (1972) para o caso de atmosferas claras ou turvas, usualmente com visibilidades de 23 km e 5 km, respectivamente.

Com o acima exposto, pode-se montar o modelo para correção

$$e_2 = \left\{ (R_2 - R_{a2}^M) - \epsilon (R_1 - R_{a1}^M) \right\} T_2^{-1} \quad (22)$$

onde os índices 2 e 1 referem-se a diferentes comprimentos de onda.

Para resultados mais precisos,  $\epsilon$  pode ser aproximado por uma lei de potências:

$$\epsilon = \frac{\tau_2}{\tau_1} = \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^{-\alpha} \quad (23)$$

onde  $\alpha$  depende da densidade e do tamanho das partículas de aerossol, com variação de 0,2 a 2 (Box e Lo, 1976).

O erro na expressão  $\Delta_2$  pode ser expresso em função da incerteza  $\Delta\alpha$  em  $\alpha$  por

$$\Delta_2 = \frac{1}{T_2} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} R_{a1}^A \alpha \Delta\alpha \quad (24)$$

A precisão pode ser melhorada se forem considerados três canais ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ), onde se tem erro ainda menor

$$\Delta(\rho_2 - \rho_1) = \left( \frac{1}{T_2} \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - \frac{1}{T_3} \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \right) R_{\alpha_1}^A \propto \Delta\alpha \quad (25)$$

A absorção atmosférica no visível é feita principalmente pelo ozônio e pode ser levada em conta, aditivamente, de maneira independente (Viollier et alii, 1980).

#### 7. CORREÇÃO DO EFEITO ATMOSFÉRICO NO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE KANAZAWA (JAPÃO)

Uma abordagem diferente do problema de correção dos efeitos da atmosfera é a apresentada pelos pesquisadores do Instituto de Tecnologia de Kanazawa, e.g. Kusaka et alii (1978), Ueno (1980). No que segue, faz-se um breve sumário do procedimento proposto em Kusaka et alii (1978).

Os processos radiativos na atmosfera são descritos no diagrama mostrado na Figura 4.

ORIGINAL PAGE IS  
OF POOR QUALITY

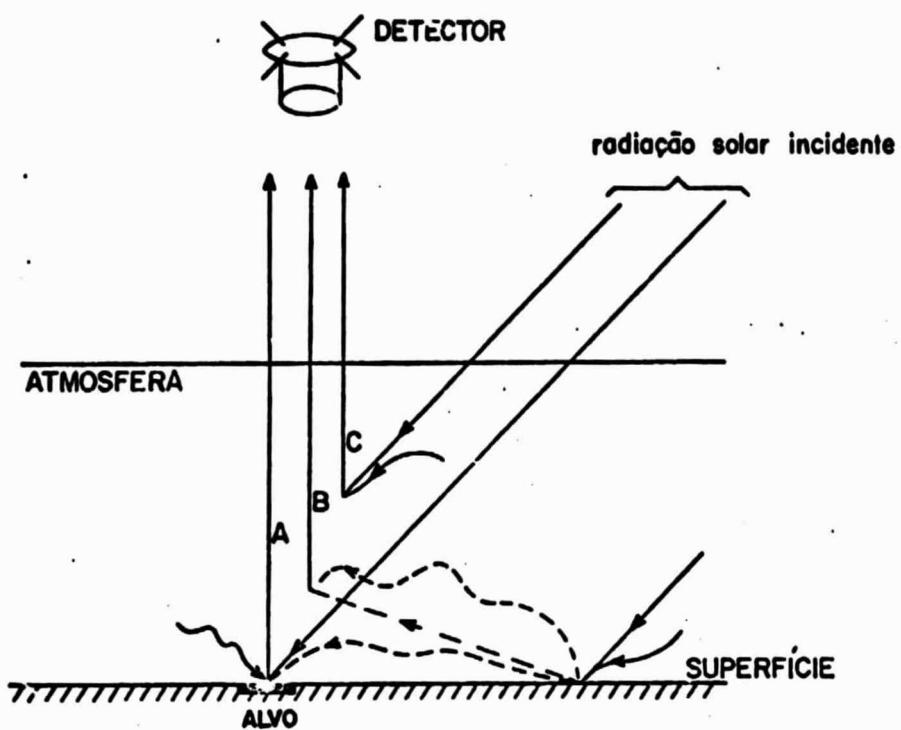


Fig. 4 - Diagrama dos processos radiativos na atmosfera com refletor não-uniforme.

Quando o sensor instalado na plataforma orbital "vê" um elemento (alvo), a radiação incidente no detector consiste em três tipos de fôtons:

Tipo A: fôtons que foram refletidos pelo alvo e diretamente transmitidos pela atmosfera;

Tipo B: fôtons que, após interagir com materiais do fundo, são transmitidos diretamente;

Tipo C: fôtons difusamente refletidos pela atmosfera livre.

A radiância de trajetória vem de fôtons dos tipo B ou do tipo C. Deste modo, o objetivo eventual será eliminar esses dois únicos tipos de fôtons de radiância observada, mantendo apenas fôtons do tipo A que fornecem informação direta sobre o alvo. A aproximação utilizada é a de espalhamento simples, e deriva-se de uma equação integral que relaciona distribuição do albedo do terreno com a distribuição de radiância observada.

Utilizando-se a geometria mostrada na Figura 5 - com a suposição de re-espalhamento simples - a radiância total recebida pelo sensor no satélite será

$$L_0(x,y) = L_I(x,y) + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} K(\xi,\eta) L_I(x+\xi, y+\eta) d\xi d\eta \quad (26)$$

A Equação 26 é uma equação integral de convolução onde a radiância intrínseca da superfície ( $L_I$ ) é a incógnita, a radiância total observada é a função forçante, e  $K(\xi, \eta)$  é a função de deslocamento. O termo  $L_C$  denota a radiância proveniente de fôtons do tipo-C, sendo desprezado no que segue (não afeta o poder de discriminação da imagem). A função forçante  $K(\xi, \eta)$  é definida como

$$K(\xi, \eta) = \int_0^H \frac{h}{(\xi^2 + \eta^2 + h^2)^{3/2}} \frac{\rho(\theta')}{4\pi} e^{-\tau(h)/\mu} \cdot \beta(h) dh \quad (27)$$

onde  $\gamma(\theta')$  é a função fase de espalhamento simples,  $H$  é a profundidade geométrica de atmosfera,  $\tau(h)$  é a profundidade ótica e  $\beta(h)$  é o coeficiente de extinção na altitude  $h$ .

Para resolver a Equação 26 para  $L_I(x,y)$ , considere-se a transformada de Fourier bidimensional de equação na forma discreta:

$$O_{mn} = I_{mn} + K_{mn} I_{mn} \quad (28)$$

onde  $I_{mn}$ ,  $O_{mn}$  e  $K_{mn}$  são coeficientes de Fourier de ordem  $(m,n)$ , das quantidades  $L_I(x,y)$ ,  $L_O(x,y)$  e  $K(\xi,\eta)$ . Obtém-se então:

$$I_{mn} = \frac{O_{mn}}{1 + K_{mn}} \quad (29)$$

As transformadas de Fourier podem ser feitas com eficiência por meio do algoritmo de FFT. Quanto aos parâmetros, a função fase de espalhamento pode ser obtida a partir do trabalho de Deirmendjian (1969); a profundidade ótica de aerosol é fornecida pelos perfis verticais de atenuação para as componentes moleculares e para os aerossóis, dados em Elternan (1968).

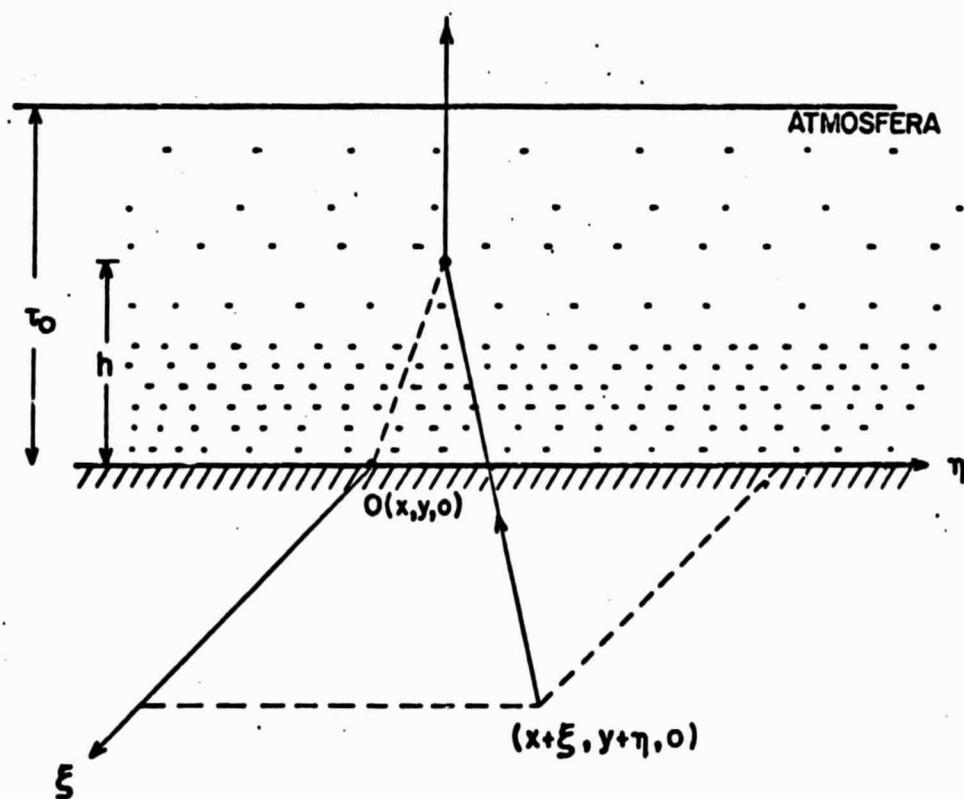


Fig. 5 - Diagrama da aproximação de reespalhamento simples.

## 8 - COMPARAÇÕES E CONCLUSÕES

Os métodos de correção atmosférica, apresentados neste trabalho, dividem-se em duas categorias: (1) métodos que visam inverter o processo físico responsável pelas distorções; neste caso, utiliza-se a teoria da transferência radiativa, sendo a questão crucial a aquisição dos parâmetros relevantes; (2) métodos que visam estabelecer uma correspondência entre imagens de datas diferentes; entre estes últimos, estão os de "extensões de assinatura".

No caso de métodos do primeiro tipo, as simplificações utilizadas dependem do problema específico a ser resolvido. O modelo de Turner (Turner e Spencer, 1972) representa uma aproximação para o caso de correção no continente, com pequena densidade de aerossóis. O trabalho de Viollier et alii (1980) é aplicável ao tratar-se com navios do mar. Uma abordagem distinta, que considera o problema de correção atmosférica como um problema de restauração e faz uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT), é utilizada pelos pesquisadores de Instituto de Tecnologia de Kawazawa (Japão) (Kusaka et alii, 1978).

Devido às dificuldades inerentes ao problema, nenhum método apresentado revelou ser suficientemente geral. Leve-se ainda em consideração que todos os trabalhos foram concebidos tendo em vista as condições atmosférica do Hemisfério Norte; no caso do Brasil, muito pouco ainda se sabe sobre os parâmetros atmosféricos. Em particular, os diversos tipos de aerossóis de atmosfera são praticamente desconhecidos.

O Instituto de Pesquisas Espaciais está, no momento, desenvolvendo um Sistema de Correção Atmosférica. Um trabalho inicial de pesquisas é representado pelas teses de mestrado de Morimoto (1980) e Bentancurt (1980). Pretende-se que o sistema seja computacionalmente eficiente, sem acarretar simplificações demais. O conhecimento acumulado na análise dos métodos expostos acima foi extremamente importante na formulação de um Algoritmo para Correção Atmosférica no INPE.

## REFERÉNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOTTERN, R. Performance tests of signature extension algorithms. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 11., Ann Arbor, MI, 1977. Proceedings. Ann Arbor, ERIM, 1977, p. 1523-1532.
- BENTANCURT, J.J.V. Processamento de dados multiespectrais obtidos por plataformas orbitais da série LANDSAT para estudos de qualidade de água da baía de Guanabara. Tese de Mestrado em Sensores Remotos e Aplicações. São José dos Campos, INPE, no prelo.
- BOT, M.A.; LO, S.Y. Approximate determination of aerosol distribution. *Journal Applied Meteorology*, 15(10): 1068-76, Oct. 1976.
- CHANDRASEKHAR, S. Radiative transfer. New York, Dover, 1950.
- CRANE, R.B. Adaptative processing of multiespectral scanner data using a decision-directed Kalman filter. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 9, Ann Arbor, MI, 1977. Proceedings Ann Arbor, ERIM, 1977.
- DEIRMENDJIAN, D. Electromagnetic scattering on spherical polydispersions. New York, American Elsevier, 1969.
- ELTERMAN, L. U.V. Visible and IR attenuation for altitudes to 50 km. Cambridge, MA, AFCRL, 1968. (AFCLR-68-0153).
- FINLEY, D. A new algorithm to correct MSS signature for atmospheric effects. Houston, TX, NASA/JSC, 1975. (NASA-LEC-6246).
- FINLEY, D.; WEHMANEN, O. Description of the OSCAR algorithm for implementation on the prototype signature extension system. Houston, TX, NASA/JSC, 1976. (NASA-LEC-8774).
- KUSAKA, T.; HABA, Y.; KAWATA, Y.; TERASHITA, Y.; UENO, S. Removal of atmospheric blurring from remotely sensed imagery. IN: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE IN PATTERN RECOGNITION, 4., Kyoto, Japão, 1978. Proceedings. Piscataway, NJ, IEEE Procs, 1979. p. 931-935.
- HENDERSON, R.G. Signature extension using the MASC algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, 14(1): 34-37, Jan. 1976.

MC CLATCHY, R.A.; FENN, R.W.; SELBY, J.E.A.; VOLZ, F.E.; GARING, J.S.  
*Optical properties of the atmosphere.* Cambridge, MA, AFCRL, 1972.  
(AFCRL-TR-72-0497).

MALILA, W.; NALEPKA, R.; SARNO, R.F. *Image enhancement and advanced information extraction techniques for ERTS-1 data.* Ann Arbor, MI, ERIM, 1975. (NASA-CR-ERIM-193300-66-F).

MORIMOTO, T. *Estudos de efeitos atmosféricos sobre as radiações percebidas pelos sensores a bordo de plataformas orbitais (ERTS-LANDSAT).* Tese de Mestrado em Meteorologia. São José dos Campos, INPE, 1980. (INPE-1689-TDL/021).

PETERS, B.C.; WALKER, H. *An iterative procedure for obtaining maximum likelihood estimates of the parameters for a mixture of normal distribution.* Houston, TX, Department of Mathematics, University of Houston, 1975. (Report n° 43).

THADANI, S.G. *The maximum likelihood estimation of signature transformation (MLEST) algorithm.* In: *MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA 4.*, West Lafayette, In, 1977. Proceedings. West Lafayette, Purdue University, 1977, p. 21-23.

TURNER, R.; SPENCER, M. *Atmosphere model for correction of spacecraft data.* In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8.*, Ann Arbor, 1972. Proceedings. An Arbor, ERIM, 1972, p. 845-947.

UEENO, S. *Inversion of solar transmitted radiance profiles for the atmospheric optical thickness.* *Applied Mathematics and Computation*, 7: 171-186, 1980.

VIOLLIER, M.; TANRE, D.; DESCHAMPS, P. *An algorithm for remote sensing of water colc. from space.* *Boundary-Layer Meteorology*, 18(3): 247-267, 1980.

WEHMANER, O. *The Kauth greeness value with application to signature extension and the drought study.* Houston TX, NASA/JSC, 1976. (NASA LEC-8080).